

COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE NEWMARK A ESCALA REGIONAL, LOCAL Y DE EMPLAZAMIENTO EN LAS CUENCAS DE LORCA Y DE GRANADA (SE ESPAÑA)

**Martín Jesús Rodríguez-Peces¹, Julián García-Mayordomo², José Miguel Azañón^{1, 3},
Juan Miguel Insua-Arévalo⁴, Jose Luis Pérez García⁵ y Jorge Delgado⁵**

¹ Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada, C/Fuentenueva s/n. 18002. Granada. Email: marpeces@ugr.es

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/La Calera, 1. 28760. Tres Cantos (Madrid). Email: julian.garcia@igme.es

³ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (Universidad de Granada-CSIC), Granada. Email: jazanon@ugr.es

⁴ Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid, 28040. Madrid. Email: insuarev@geo.ucm.es

⁵ Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén, Campus de las Lagunillas, s/n. Edif. A3, 23071 Jaén. Email: jlperez@ujaen.es, jdelgado@ujaen.es

RESUMEN

En este trabajo presentamos un estudio de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos a escala regional, local y de emplazamiento en las cuencas de Lorca y de Granada. Para las escalas regional y local hemos aplicado el método del “bloque rígido deslizante” de Newmark mediante un sistema de información geográfica (SIG), mientras que para la escala del emplazamiento se han realizado estudios de detalle empleando programas de equilibrio límite. Hemos seleccionado tres casos: los desprendimientos rocosos relacionados con las recientes series sísmicas de Bullas 2002 ($m_{bLg}=4.8$) y La Paca 2005 ($m_{bLg}=4.7$) en la Cuenca de Lorca (Murcia) y el deslizamiento de Güevéjar relacionado con el terremoto histórico de Arenas del Rey 1884 ($I_{MSK}=X$) en la Cuenca de Granada. Finalmente, hemos comparado los valores de factor de seguridad, aceleración crítica y desplazamiento de Newmark obtenidos a diferentes escalas con objeto de mejorar la calibración del método de Newmark a escala regional.

1. INTRODUCCIÓN

En 1965 el Ingeniero Civil Nathan M. Newmark ideó un sencillo método para estimar el desplazamiento permanente producido por un movimiento sísmico en presas de tierra (Newmark, 1965). Este método, con ligeras variaciones, fue posteriormente aplicado con éxito al estudio de laderas naturales (Wilson y Keefer, 1983) y, actualmente, es común su aplicación en estudios de evaluación de la ocurrencia de inestabilidades de ladera desencadenadas por terremotos (e.g. Miles y Ho, 1999; Jibson et al., 2000; Luzi et al., 2000; Romeo, 2000; Carro et al. 2003). Sin embargo, existen muy pocos estudios que aborden esta problemática en España (e.g. García-Mayordomo, 1999; Mulas et al., 2003; Delgado et al., 2006). Una completa revisión puede encontrarse en García-Mayordomo et al. (2009).

En este trabajo presentamos un análisis sobre inestabilidades de ladera generadas por terremotos a tres escalas diferentes: regional, local y de emplazamiento. Para la escala regional, hemos aplicado el método de Newmark mediante un SIG (ArcGIS) con objeto de producir un conjunto de mapas de desplazamiento de Newmark para diferentes escenarios sísmicos en la Cuenca de Lorca (Murcia) y la Cuenca de Granada. Estas regiones, además de presentar un notable nivel de actividad sísmica y contener algunas de las fallas activas con mayor potencial sísmico en España, tienen casos reconocidos de desprendimientos y deslizamientos asociados a terremotos modernos (e.g. Bullas 2002, La Paca 2005) e históricos (e.g. Arenas del Rey 1884). Para las escalas local y de emplazamiento, hemos aplicado el método de Newmark a los conocidos casos de desprendimientos rocosos de Bullas y de La Paca (Fig. 1A y 1B) que fueron provocados por los terremotos de Bullas en 2002 ($m_{bLg}=4.8$, $I_{EMS}=V$) y La Paca en 2005 ($m_{bLg}=4.7$, $I_{EMS}=VII$), respectivamente. Estos terremotos produjeron daños en las poblaciones de La Paca y de Zarcilla de Ramos y causaron una importante alarma social. También hemos aplicado esta metodología al deslizamiento de Güevéjar (Fig. 1C) que fue provocado por el terremoto de Arenas del Rey en 1884 ($I_{MSK}=X$, $M_w \sim 6.5$).

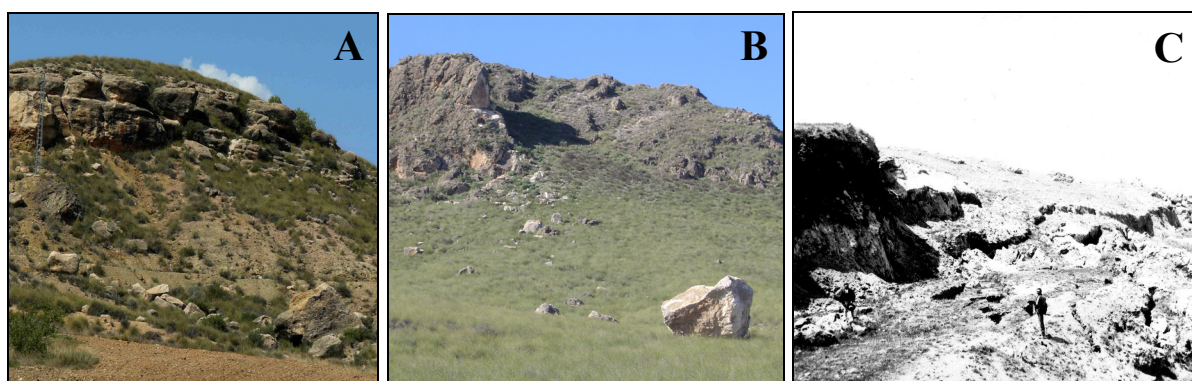


Figura 1. Inestabilidades de ladera inducidas por terremotos. A: Desprendimiento de Bullas en 2002. B: Desprendimiento de La Paca en 2005. C: Escarpe de cabecera del deslizamiento de Güevéjar en 1884.

Para la escala de emplazamiento, hemos realizado un análisis retrospectivo de estas inestabilidades de ladera para calcular el factor de seguridad estático previo al terremoto y la correspondiente aceleración crítica. Por último, hemos comparado los valores de factor de seguridad, de aceleración crítica y de desplazamiento de Newmark obtenidos a escala de emplazamiento con las estimaciones realizadas mediante el SIG con la finalidad de mejorar la calibración del método de Newmark a escala regional.

2. METODOLOGÍA

El método de Newmark (1965) o del “bloque rígido deslizante” establece que, dada una ladera con factor de seguridad estático conocido, la aceleración sísmica horizontal mínima necesaria para sobrepasar la resistencia al corte e iniciar el desplazamiento es:

$$a_c = (FS - 1) g \operatorname{sen}(\alpha) \quad (1)$$

donde a_c es la aceleración crítica (unidades g, $1g = 9,8 \text{ m/s}^2$), g es la aceleración de la gravedad, FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo del talud. La aceleración crítica es un índice de susceptibilidad de las laderas a inestabilidades inducidas sísmicamente. Conocida la aceleración crítica, el cálculo del desplazamiento teórico que se produce en la ladera a causa del terremoto –i.e., desplazamiento de Newmark (D_N), se realiza integrando doblemente los intervalos de tiempo en que la aceleración crítica es superada durante una historia completa del movimiento del suelo (acelerograma).

ESCALA REGIONAL Y LOCAL

Para aplicar el método de Newmark a escala regional es más conveniente emplear ecuaciones de regresión del D_N con parámetros del movimiento del suelo tales como la Intensidad de Arias o la aceleración sísmica de pico (PGA, *Peak Ground Acceleration*) (cf. Jibson, 2007). Para más detalles de la aplicación del método de Newmark a escala regional se remite al lector a Rodríguez-Peces et al. (2008). El modelo digital de elevaciones (MDE) empleado para los desprendimientos de Bullas y de La Paca a escala regional presenta un tamaño de píxel de 25x25 m. Este MDE fue obtenido a partir de los mapas topográficos de la Región de Murcia del Instituto Geográfico Nacional (IGN). En el caso del deslizamiento de Güevéjar hemos utilizado el MDE elaborado por la Junta de Andalucía con un tamaño de píxel de 10x10 m.

Para aplicar el método de Newmark a escala local hemos aplicado la metodología regional empleando MDE de alta resolución (0.10x0.10 m) de las áreas donde se produjeron los desprendimientos de Bullas y de La Paca (Fig. 2). Estos MDE se han obtenido mediante la utilización de un láser escáner terrestre marca *OPTECH* de gran alcance (1000-1500 m). La captura de los datos se ha realizado en varias tomas y desde diferentes puntos de vista, de tal manera que toda la zona quedara capturada a una resolución centimétrica. Una vez que se dispone de los escaneos individuales se lleva a

cabo la fase de unión de los mismos en un único sistema de referencia local, para posteriormente llevarlo al sistema de referencia global (UTM-30 ED50). Finalmente, la nube de puntos ha de ser editada manualmente y mediante el uso de diferentes filtros para eliminar la vegetación y los bloques rocosos existentes. Una vez que se dispone de la nube de puntos sobre el terreno, se ha interpolado un MDE con un tamaño de píxel de 2.5x2.5 m. Debido a la gran extensión del deslizamiento de Güevéjar, no se ha podido obtener un MDE de alta resolución del mismo. En la actualidad se está trabajando en este aspecto.

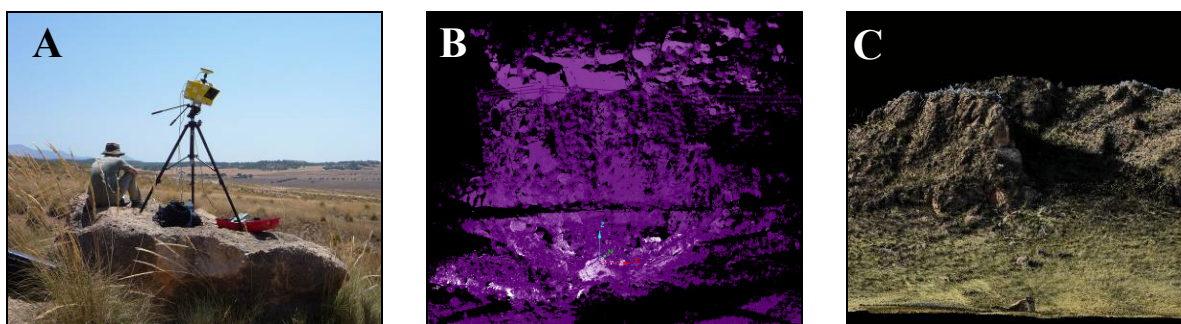


Figura 2. Obtención del MDE mediante láser escáner terrestre. A: Proceso de escaneado. B: Nube de puntos del área de Bullas 2002. C: Nube de puntos del área de La Paca 2005.

ESCALA DE EMPLAZAMIENTO

Para el cálculo de los valores de factor de seguridad y de aceleración crítica, se ha realizado un análisis retrospectivo de los tres casos de inestabilidad de ladera. Para ello hemos realizado campañas de campo para obtener la geometría y los parámetros resistentes de cada ladera. En primer lugar, se han establecido los parámetros resistentes de la superficie de rotura a partir de datos de campo mediante el empleo del martillo Schmidt y de ensayos de laboratorio. Seguidamente, hemos empleado los MDE de alta resolución y las observaciones de campo para generar los perfiles topográficos correspondientes a la trayectoria de los bloques de roca caídos (Bullas 2002, La Paca 2005). Para el caso del deslizamiento de Güevéjar, el perfil topográfico previo al deslizamiento se ha reconstruido a partir del MDE con tamaño de píxel de 10x10 m. Para ello se ha eliminado las curvas de nivel dentro del actual deslizamiento y se ha interpolado la superficie topográfica previa. Finalmente, para realizar el análisis retrospectivo hemos utilizado un programa de análisis de estabilidad de laderas en 2D (Rocscience Inc. SLIDE). En los modelos generados, hemos fijado el valor de aceleración sísmica horizontal mediante iteración hasta que el factor de seguridad obtenido fuera igual a 1 (condiciones metaestables). Este valor de aceleración sísmica representa una estimación más precisa de la aceleración crítica en el emplazamiento. El valor del factor de seguridad previo al terremoto se ha obtenido eliminando el efecto de la aceleración sísmica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESCALA REGIONAL (25 x 25 m)

En el área de rotura del desprendimiento de Bullas los valores de factor de seguridad varían entre 1.6 y 2.0 y los valores de aceleración crítica entre 0.24g y 0.39g (Fig. 3). En el área de rotura del desprendimiento de la Paca los valores de factor de seguridad varían entre 1.4 y 2.0 y los valores de aceleración crítica entre 0.22g y 0.50g (Fig. 4).

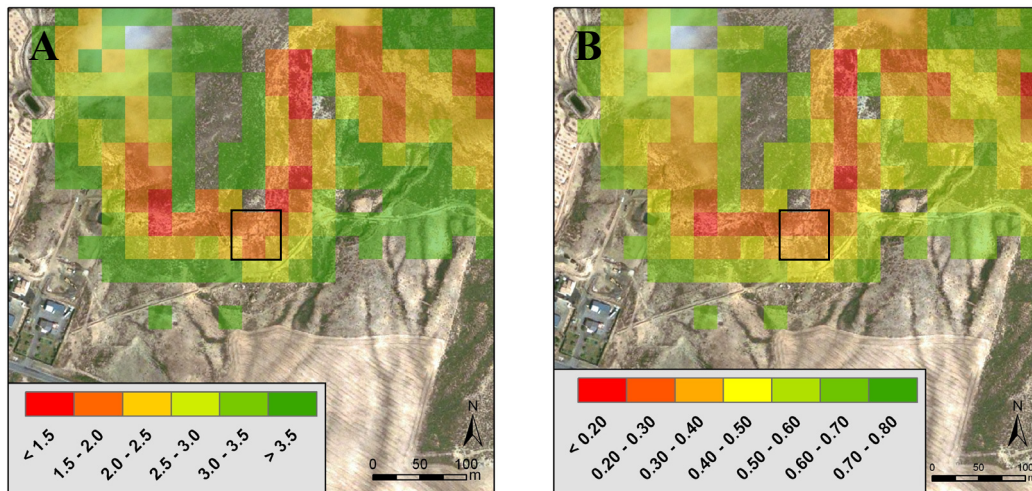


Figura 3. Mapas de factor de seguridad (A) y de aceleración crítica (B) en el área del desprendimiento de Bullas con tamaño de píxel de 25x25 m (escala regional). El cuadrado negro indica la localización de la superficie de rotura del desprendimiento de Bullas.

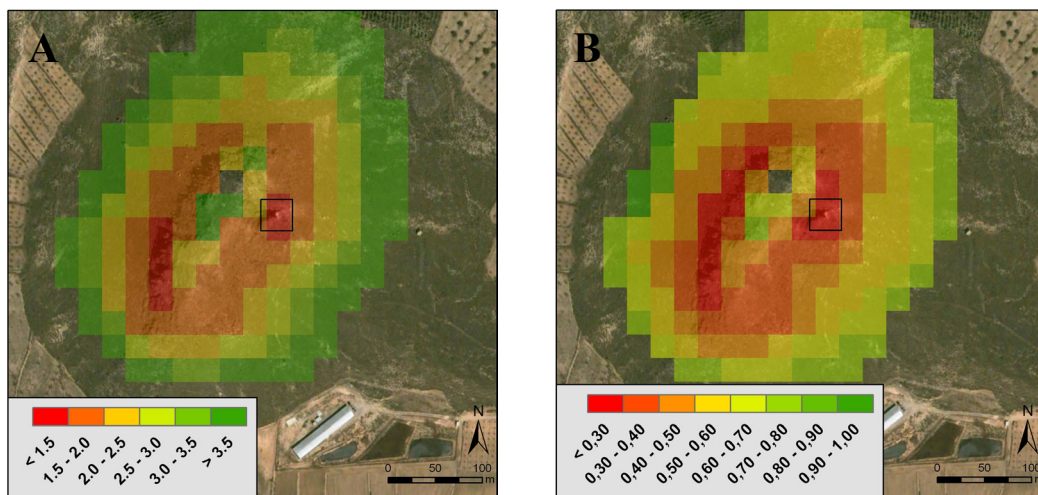


Figura 4. Mapas de factor de seguridad (A) y de aceleración crítica (B) en el área del desprendimiento de La Paca con tamaño de píxel de 25x25 m (escala regional). El cuadrado negro indica la localización de la superficie de rotura del desprendimiento de La Paca.

Los desplazamientos de Newmark estimados a escala regional para la ocurrencia del terremoto más probable para un periodo de retorno de 475 años ($M_w=5.0$) presentan en ambos casos valores bajos, en su mayoría menores de 2 cm (Rodríguez-Peces et al., 2008). Sin embargo, los escenarios sísmicos para los terremotos de Bullas en 2002 ($M_w=5.0$) y La Paca en 2005 ($M_w=4.8$) presentan desplazamientos de Newmark nulos, lo que implica que estas laderas no se movieron con dichos terremotos. Esto es debido a que en ambos casos hemos obtenido valores relativamente altos de factor de seguridad y, por lo tanto, valores relativamente altos de aceleración crítica (Tabla 1). Por tanto, un mapa regional con tamaño de píxel de 25x25 m no es apropiado para estimar el desplazamiento de Newmark para la localización específica de estos desprendimientos. Sin embargo, los mapas regionales de factor de seguridad y de aceleración crítica (Fig. 3 y 4) sí son útiles para identificar preliminarmente las áreas con mayor potencial de peligro y que pueden ser estudiadas con mayor detalle posteriormente.

ESCALA LOCAL (2.5x2.5 m)

En el área de rotura del desprendimiento de Bullas los valores de factor de seguridad varían entre 1.0 y 1.9 y los valores de aceleración crítica entre 0.02g y 0.40g (Fig. 5).

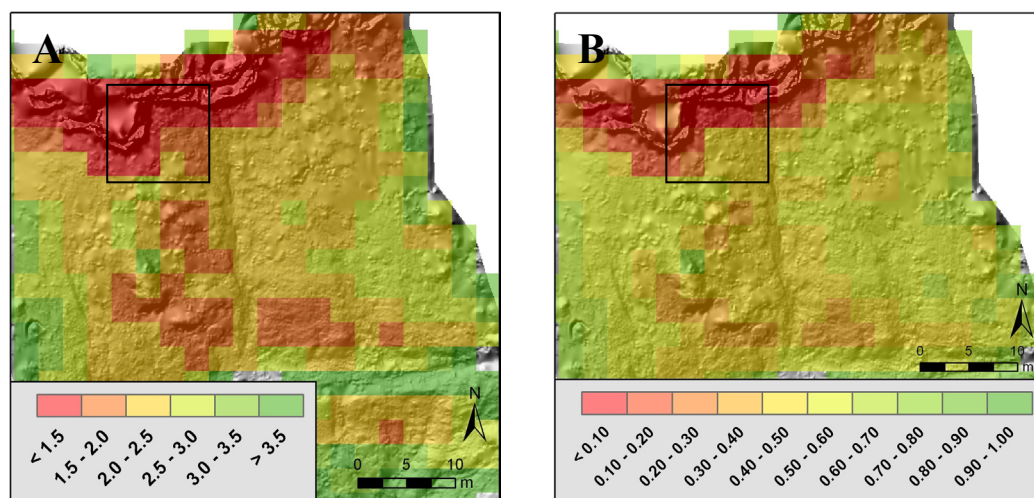


Figura 5. Mapas de factor de seguridad (A) y de aceleración crítica (B) en el área del desprendimiento de Bullas con tamaño de píxel de 2.5x2.5 m (escala local). El cuadrado negro indica la localización de la superficie de rotura del desprendimiento de Bullas.

En el área de rotura del desprendimiento de la Paca los valores de factor de seguridad varían entre 1.0 y 1.7 y los valores de aceleración crítica entre 0.03g y 0.45g (Fig. 6).

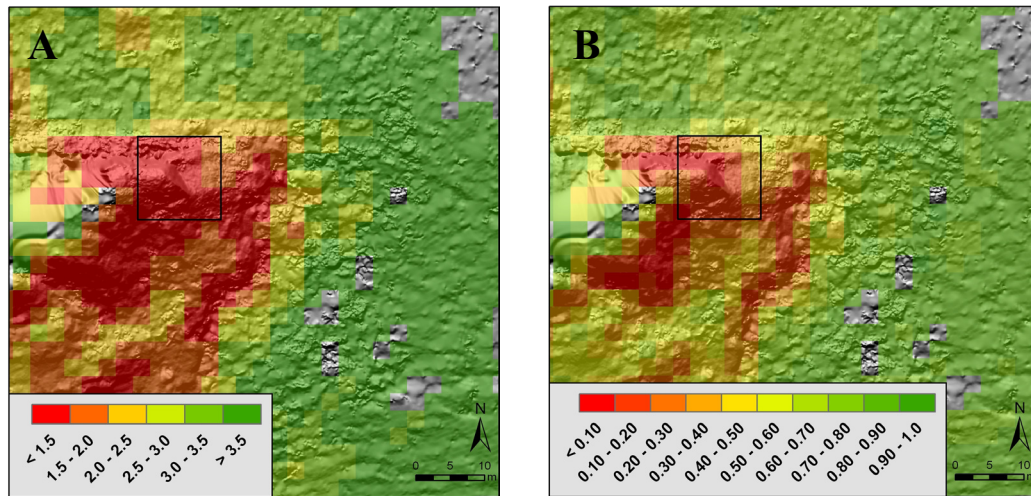


Figura 6. Mapas de factor de seguridad (A) y de aceleración crítica (B) en el área del desprendimiento de La Paca con tamaño de píxel de 2.5x2.5 m (escala local). El cuadrado negro indica la localización de la superficie de rotura del desprendimiento de La Paca.

Los desplazamientos de Newmark para la ocurrencia del terremoto más probable para periodo de retorno de 475 años ($M_w=5.0$) presentan en ambos casos valores más elevados, siendo mayores de 2 cm y, localmente, mayores de 5 cm (Rodríguez-Peces et al., 2008). Por otra parte, los escenarios sísmicos para los terremotos de Bullas en 2002 ($M_w=5.0$) y La Paca en 2005 ($M_w=4.8$) presentan desplazamientos de Newmark menores de 2 cm y, localmente, mayores de 5 cm. Los desplazamientos de Newmark obtenidos en la zona de rotura de los desprendimientos de Bullas y de La Paca son 0.11 cm y 0.18 cm, respectivamente. Por tanto, pequeños desplazamientos de Newmark serían potencialmente suficientes para generar desprendimientos de este tipo. A esta escala, hemos obtenido valores más bajos de factor de seguridad y de aceleración crítica (Tabla 1) y los valores de factor de seguridad previo al terremoto están muy próximo a la condición de inestabilidad ($FS < 1.0$). Además, estos mapas permiten identificar las áreas de rotura de ambos desprendimientos con razonable precisión (Fig. 5 y 6).

ESCALA DE EMPLAZAMIENTO

Desprendimiento de Bullas en 2002

Los parámetros resistentes de los conglomerados cementados afectados por el desprendimiento (Fig. 7) han sido obtenidos mediante el empleo del martillo Schmidt y siguiendo el criterio de Barton-Bandis. El valor del coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (JRC, *Joint Roughness Coefficient*) obtenido es de 4 y la resistencia a compresión de la discontinuidad (JCS, *Joint wall Compressive Strength*) es de 108250 kN/m² (66500-150000 kN/m²). El valor del ángulo de fricción residual es de 30° (27-33°). Para las arcillas triásicas de la base se han realizado ensayos de corte de tipo CD,

obteniéndose un peso específico de 20.6 kN/m^3 , una cohesión de 33.4 kN/m^2 y un ángulo de fricción de 23.4° . El valor de aceleración crítica calculado mediante el programa Slide y el perfil topográfico de alta resolución del desprendimiento de Bullas es de $0.08g$. Este valor es una estimación coherente ya que es menor que la PGA ($0.12g$) estimada para el terremoto de Bullas en 2002. El valor de factor de seguridad obtenido mediante el método de equilibrio límite de Janbu simplificado para el desprendimiento de Bullas es de 1.07.

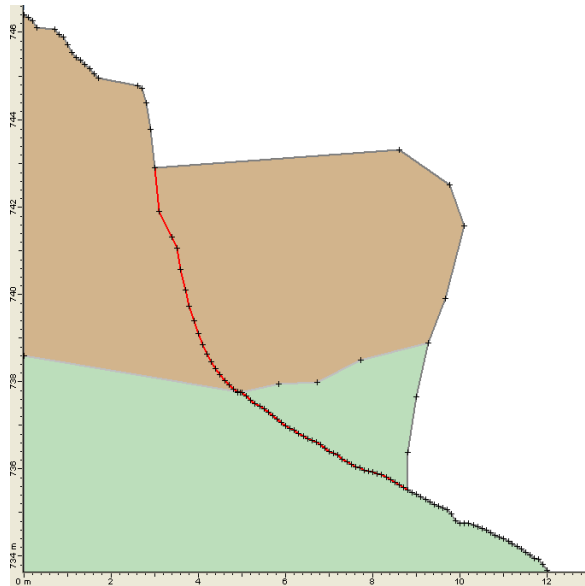


Figura 7. Modelo del desprendimiento de Bullas empleado en el programa de estabilidad de laderas (Slide). La línea roja muestra la superficie de rotura.

Estos valores de factor de seguridad y de aceleración crítica son muy similares a los obtenidos a escala local (Tabla 1). El factor de seguridad previo al terremoto es ligeramente menor y también está próximo a la condición de inestabilidad. El escenario determinista para el terremoto de Bullas en 2002 ($M_w=5.0$) presenta un desplazamiento de Newmark de 0.22 cm.

Escala	Regional	Local	Emplazamiento
FS	1.92	1.08	1.07
a_c	0.32	0.09	0.08
D_N Bullas	0	0.11	0.22
D_N $M_w=5$	0	1.16	1.98

Tabla 1. Valores de factor de seguridad estático (FS), aceleración crítica (a_c , unidades g) y desplazamiento de Newmark (D_N , cm) obtenidos en el desprendimiento de Bullas a escala regional, local y de emplazamiento.

Desprendimiento de La Paca en 2005

Los parámetros resistentes de las dolomías triásicas afectadas por el desprendimiento (Fig. 8) también han sido obtenidos mediante el empleo del martillo Schmidt. El valor del JRC obtenido es de 5 y el JCS es de 25550 kN/m^2 ($19520\text{-}31580 \text{ kN/m}^2$). El valor del ángulo de fricción residual es de 30° ($26\text{-}34^\circ$). El valor de aceleración crítica calculado mediante el programa Slide y el perfil topográfico de alta resolución del desprendimiento de La Paca es de $0.09g$. Este valor es una estimación coherente ya que es menor que la PGA ($0.13g$) estimada para el terremoto de La Paca en 2005. El valor de factor de seguridad obtenido mediante el método de equilibrio límite de Janbu simplificado para el desprendimiento de La Paca es de 1.09.

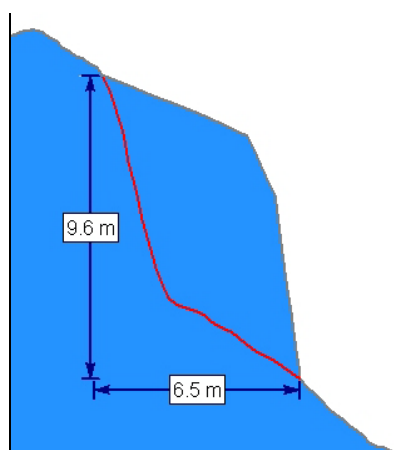


Figura 8. Modelo del desprendimiento de La Paca empleado en el programa de estabilidad de laderas (Slide). La línea roja muestra la superficie de rotura.

Estos valores de factor de seguridad y de aceleración crítica son muy similares a los obtenidos a escala local (Tabla 2). El factor de seguridad previo al terremoto es ligeramente menor y también está próximo a la condición de inestabilidad. En este caso, el escenario determinista para el terremoto de La Paca en 2005 ($M_w=4.8$) también presenta un desplazamiento de Newmark de 0.18 cm .

Escala	Regional	Local	Emplazamiento
FS	1.46	1.10	1.09
a_c	0.25	0.08	0.09
D_N La Paca	0	0.18	0.18
D_N $M_w=5$	0.35	3.82	1.98

Tabla 2. Valores de factor de seguridad estático (FS), aceleración crítica (a_c , unidades g) y desplazamiento de Newmark (D_N , cm) obtenidos en el desprendimiento de La Paca a escala regional, local y de emplazamiento.

Deslizamiento de Güevéjar en 1884

Los parámetros resistentes de los materiales involucrados en el deslizamiento de Güevéjar (Fig. 9) han sido adoptados a partir de ensayos de laboratorio realizados en litologías similares en áreas próximas al deslizamiento (Azañón et al., 2006). La distribución de los materiales y la posición del nivel freático alto (condiciones saturadas) se han establecido a partir de los datos aportados por Jiménez Pintor y Azor (2006).

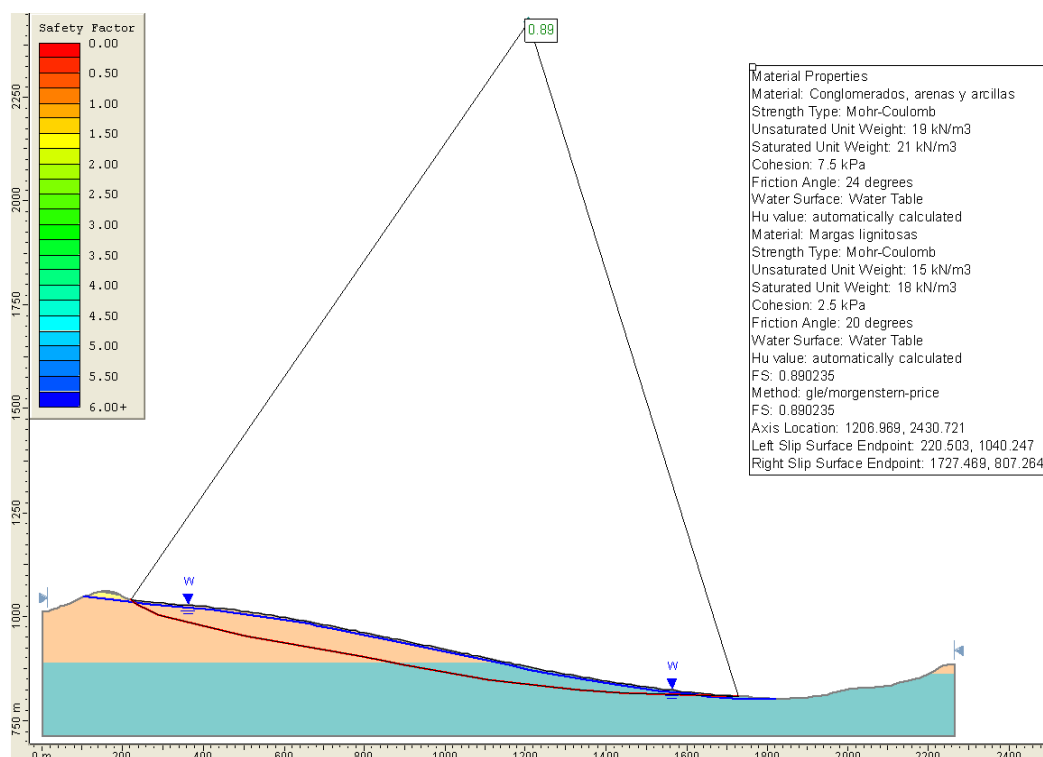


Figura 9. Modelo del deslizamiento de Güevéjar empleado en el programa de estabilidad de laderas (Slide). La línea roja muestra la superficie de rotura. La línea azul muestra el nivel freático (condiciones saturadas).

El terremoto de Arenas del Rey en 1884 fue sentido en Güevéjar con una intensidad de VII (Muñoz and Udías, 1981). Hemos estimado una PGA equivalente de 0.15g (0.11-0.18g) empleando diferentes relaciones Intensidad-PGA para el área Mediterránea. El factor de seguridad obtenido mediante el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price es de 0.89. Eliminando la aceleración sísmica, se obtiene que el factor de seguridad previo al terremoto es de 1.40. Por tanto, la aceleración crítica es de 0.10g que es equivalente a una intensidad crítica de VI, la cual es un grado de intensidad menor que la intensidad registrada durante el terremoto de Arenas del Rey de 1884 en Güevéjar.

En este caso, las diferencias entre los valores de factor de seguridad, aceleración crítica y de intensidad crítica (Tabla 3) a escala regional y de emplazamiento no son demasiado

notables. Esto se debe a que la gran extensión del deslizamiento de Güevéjar hace que ambas escalas sean prácticamente equivalentes.

Escala	Regional	Emplazamiento
FS	1.70	1.40
a_c	0.12	0.10
I_c	VI-VII	VI

Tabla 3. Comparación entre los valores de factor de seguridad estático (FS), aceleración crítica (a_c , unidades g) Intensidad crítica (I_c) obtenidos en deslizamiento de Güevéjar para las escalas regional y de emplazamiento.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha comprobado que la previsión de los mapas de desplazamiento Newmark para escalas locales coincide bastante con la que se obtendría en estudios de detalle a escala del emplazamiento. Además, el hecho de que los valores de factor de seguridad y de aceleración crítica obtenidos en ambas escalas sean muy similares, permite justificar los parámetros resistentes y el método de equilibrio límite empleados a escala regional y local.

Por otra parte, se ha comprobado que para escalas regionales los resultados están condicionados por el tamaño de píxel del MDE y por las dimensiones de la inestabilidad de ladera. Para los casos de Bullas y La Paca, el tamaño de píxel de 25x25m es mayor que los desprendimientos resultando en valores de factor de seguridad y aceleración crítica más elevados de los obtenidos a escala local y de emplazamiento. Sin embargo, en el caso de Güevéjar, los resultados a escala regional y de emplazamiento coinciden bastante ya que la dimensión del deslizamiento es mayor que el tamaño de píxel (10x10m).

Las estimaciones de los valores de PGA y de los desplazamientos de Newmark serían mucho más precisas si se dispusiera de acelerogramas de cada terremoto representativos del emplazamiento donde se localizan las inestabilidades de ladera. Por último, estas conclusiones deben ser contrastadas con el estudio de más casos de inestabilidades de ladera provocadas por terremotos.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a los proyectos TOPOIBERIA CONSOLIDER-INGENIO2010 CSD2006-00041 y al SISMILAD del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

REFERENCIAS

Azañón, J.M., Azor, A., Cardenal Escarcena, J.F., Delgado García, J., Delgado Marchal, J., Gómez

- Molina, A., López Chicano, M., López Sánchez, J.M., Mallorqui Franquet, J.J., Martín Rosales, W., Mata de Castro, E., Mateos Riuz, R., Nieto García, F., Peña Ruano, J.A., Pérez García, J.L., Puerma Castillo, M., Rodríguez Fernández, J., Teixidó Ullod, T., Tomás Jover, R., Tsige Aga, M., Yesares García, J., 2006. *Estudio sobre la predicción y mitigación de movimientos de ladera en vías de comunicación estratégicas de la Junta de Andalucía. Informe final*. Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR (Ed.), Granada (Spain).
- Carro, M., De Amicis, M., Luzi, L. and Marzorati, S., 2003. The application of predictive modelling techniques to landslides induced by earthquakes: the case study of the 26 September 1997 Umbria-Marche earthquake (Italy). *Engineering Geology*, 69: 139-159.
- Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech C. y Cuenca A., 2006. Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos. Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (3-4): 197-218.
- García-Mayordomo, J., 1999. Zonificación Sísmica de la Cuenca de Alcoy Mediante un Sistema de Información Geográfico. *1º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 12-16 de Abril, Murcia. Memorias, Tomo Ib: 443-450.
- García-Mayordomo, J., Rodríguez Peces, M.J., Azañón, J.M. and Insua Arévalo, J.M., 2009. Advances and trends on earthquake-triggered landslide research in Spain. *1st International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology*. 7-14 de Septiembre, Baelo Claudia (Cádiz), 4 pp.
- Jibson, R.W., 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91: 209-218.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. and Michael, J.A., 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58: 271-289.
- Jiménez Pintor, J. y Azor, A., 2006. El Deslizamiento de Güevéjar (provincia de Granada): un caso de inestabilidad de laderas inducida por sismos. *Geogaceta*, 40: 287-290.
- Luzi, L., Pergalani, F. and Terlien, M.T.J., 2000. Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology*, 58: 313-336.
- Mulas, J., Ponce de León, D. y Reoyo, E., 2003. Microzonación sísmica de movimientos de ladera en una zona del Pirineo Central. En: *2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*: 13-26.
- Muñoz, D. y Udías, A., 1981. Estudio de los parámetros y serie de replicas del terremoto de Andalucía del 25 de Diciembre de 1884 y la sismicidad de la región de Granada-Málaga. En: *El Terremoto de Andalucía de 25 de Diciembre de 1884*. Instituto Geográfico Nacional (Ed.), Madrid (Spain): 95-139.
- Newmark, N.M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Géotechnique*, 15: 139-160.
- Rodríguez Peces, M.J., García Mayordomo, J., Azañón-Hernández, J.M. y Jabaloy Sánchez, A., 2008. Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico en la Cuenca de Lorca (Murcia): Implementación del método de Newmark en un SIG. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 459-472.
- Romeo, R., 2000. Seismically induced landslide displacements: a predictive model. *Engineering Geology*, 58: 337-351.
- Wilson, R.C. and Keefer, D.K., 1983. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73: 863-877.